

Asymetria parametrów bifilarnego toru wielkoprądowego pieca łukowo-oporowego

Streszczenie. Do procesu wytopu żelazostopów stosuje się głównie piece łukowo-oporowe. W piecach łukowo-oporowych stosowane są segmentowe elektrody Söderberga, które wymagają odpowiednich konstrukcji torów wielkoprądowych podłączonych do uzwojeń wtórnych jednofazowych transformatorów mocy. W artykule przedstawiono układy zasilania pieca z wyeksponowaniem punktów pomiarowych w bifilarnych torach wielkoprądowych służących do określenia asymetrii prądowej i impedancyjnej. Przedstawiono wykresy zmian wartości skutecznych napięć i prądów w poszczególnych torach oraz wyniki analizy harmonicznej. Wyznaczono względne wskaźniki asymetrii prądowych torów pieca łukowo-oporowego podczas procesu wytopu.

Abstract. Submerged arc-resistance furnaces are mainly used for the production of ferroalloys. Segmental Söderberg electrodes are used in arc-resistance furnaces. These electrodes require the specific construction of high-current paths connected to the secondary windings of single-phase power transformers. The article presents power supply system of the furnace with the measurement points in bifilar high current circuits for determining the asymmetry of currents and impedances. Graphs of voltages and currents and of harmonic analysis in high current circuits are presented. Relative indicators of current asymmetry in high-current paths of the arc-resistance furnace during the melting process were determined. (Asymmetry of parameters of the bifilar high-current circuits supplying the arc-resistance furnace).

Słowa kluczowe: elektryczny piec łukowo-oporowy, analiza harmoniczna.

Keywords: electric arc-resistance furnace, harmonic analysis.

Wstęp

Piece elektryczne łukowo - oporowe przeznaczone są do produkcji żelazostopów metodą redukcji tlenków metali. W piecach tych prąd przepływa w wyniku tworzenia się licznych łuków elektrycznych pomiędzy elektrodami a wsadem, a częściowo również bezpośrednio przez elektrody pograżone we wsadzie. Wsad nagrzewany jest w wyniku konwekcji i promieniowania ciepła pozyskiwanego z łuku elektrycznego, a także na skutek rezystancji własnej wsadu. Żelazostopy to stopy żelaza z innymi pierwiastkami takimi jak krzem (żelazokrzem - FeSi), krzem i mangan (żelazokrzemomangan - FeSiMn) o różnych procentowych udziałach krzemu i manganu. Żelazostopy służą do odtleniania i odgazowania stali, również do wprowadzania do niej dodatków stopowych. Żelazostopy i inne dodatki metalurgiczne decydują o jakości i ostatecznych parametrach stali i żeliwa produkowanych w hutach. W zależności od mocy, piece łukowo-oporowe do produkcji żelazostopów dzieli się na jednofazowe i trójfazowe o różnym układzie geometrycznym elektrod. Piece trójfazowe dzieli się na stałe, przechylne, z obrotowym trzonem, otwarte, półzamknięte, zamknięte. O przynależności pieca do danej grupy urządzeń świadczy zakres jego temperatur roboczych oraz ilości wytwarzanych gazów odlotowych. Układ zasilania elektroenergetycznego przekształca energię elektryczną z poziomu wysokiego napięcia na prąd o dużym natężeniu przy jednoczesnym niskim napięciu za pośrednictwem transformatorów i autotransformatorów. Prowadzenie procesu produkcji żelazo-stopów w piecach łukowo-oporowych oparte jest na sterowaniu natężeniem prądu i mocą, utrzymując stałe ich wartości, przez podnoszenie lub opuszczanie elektrod w głąb wsadu. W wytapianiu żelazostopów stosowane są elektrody samospiekające się tzw. elektrody Söderberga lub wstępnie spiekane elektrody pełne lub drażone.

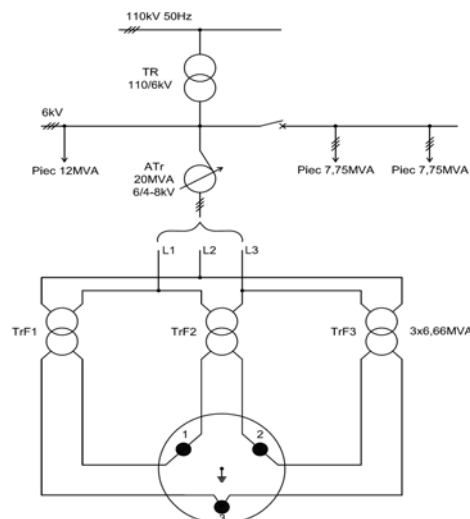
Charakterystyka techniczna układu zasilania pieca łukowo-oporowego

Przykładem instalacji pieca łukowo-oporowego jest linia technologiczna procesu wytopu żelazokrzemu i żelazokrzemomanganu opisana w publikacji [1]. Schemat tej instalacji został zaprezentowany na rysunku 1. Łączna moc pozorna trójfazowego pieca łukowo-oporowego wynosi 20 MVA i zasilany jest on przez autotransformator

posiadający 25 zaczepek za, pomocą których można regulować pod obciążeniem napięcia fazowe tak, by napięcia wtórne transformatorów jednofazowych TrF1 ÷ TrF3 zmieniały się w granicach od 100 do 200 V. Znamionowy prąd elektrod pieca łukowo-oporowego wynosi 33 kA.

Pojemność wsadowa wanny pieca wynosi ok. 75 m³, a wsad w piecu uzupełniany jest na bieżąco w miarę jego schodzenia w strefę reakcji, co powoduje zmiany rezystywności wsadu. Zmienna dynamicznie rezystancja wsadu, bocznikująca rezystancję łuku, oraz asymetria toru wielkoprądowego związana ze zróżnicowanym położeniem końców elektrod we wsadzie powoduje, iż piec służący do wytwarzania żelazo-stopów z punktu widzenia jakości pobieranej energii elektrycznej jest odbiornikiem nieliniowym.

Dla uzyskania symetrii elektrycznej, wokół pieca można instalować trzy transformatory jednofazowe (rys. 1). Elektrody przyłączone są do układu zasilania elektrycznego zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat zasilania pieca łukowo-oporowego

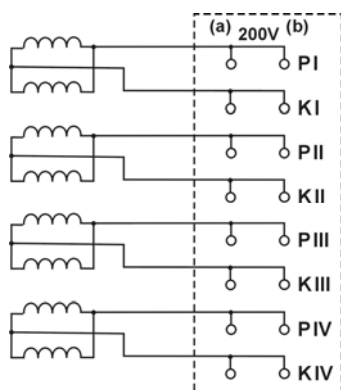
Parametry techniczne autotransformatora ATr i fazowych transformatorów piecowych TrF1 ÷ TrF3 przedstawiono w tabeli 1.

Z poziomu rozdzielni 6 kV zasilane są inne piece łukowo-oporowe o różnych mocach oraz kilka jednostek

baterii do kompensacji mocy biernej. Uzwojenia wtórne transformatorów piecowych TrF1 ÷ TrF3 złożone są z czterech obwodów, w każdym po dwa uzwojenia o połączeniu równoległym, zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 2.

Tabela 1. Parametry urządzeń zasilających piec łukowo-oporowy

Parametry	Jednostka	ATr	TrF1÷ TrF3
S_N	kVA	20000	6666
S_{max}	kVA		8900
U_{NGN}	V	6000 ± 2000 (± 12 st)	$8000 \pm 3\%$ (± 1 st)
I_{NGN}	A	1925	809-833-859
U_{NDN}	V	6000	100 ... 200
I_{NDN}	A	809-833-859	33330
$I_{max Dn}$	A		44500
$u_z \%$	%	2,24	2,87-2,93-2,98
ΔP_l	kW	10,7	9,4
ΔP_{Cu}	kW	102,2	48,1-49-50,6
Grupa połączeń		YNyn0	-
Chłodzenie		OFAF	OFAF



Rys. 2. Schemat połączeń uzwojeń wtórnych transformatorów piecowych TrF1 ÷ TrF3

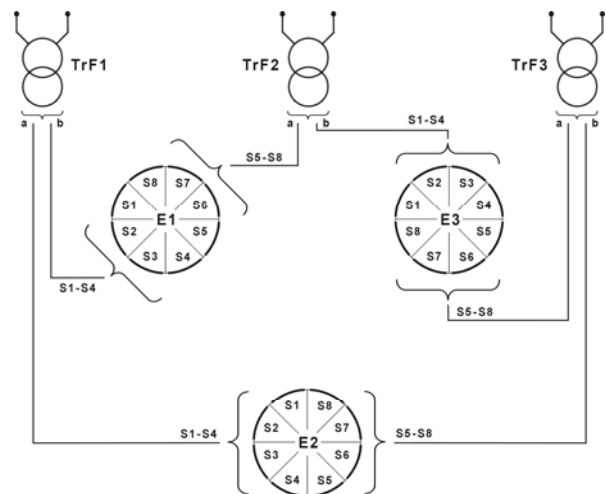
Elektrody Söderberga pieca łukowo-oporowego składają się z ośmiu segmentów (rys. 3), do których doprowadzone są tory wieloprądowe z uzwojeń wtórnych transformatorów fazowych TrF1 ÷ TrF3. Sposób prowadzenia torów do poszczególnych segmentów elektrod posiada cechy torów bifilarnych [2] i przedstawiony został na schematycznym rysunku 3.

Diagnostyczny układ pomiarowy pieca łukowo-oporowego

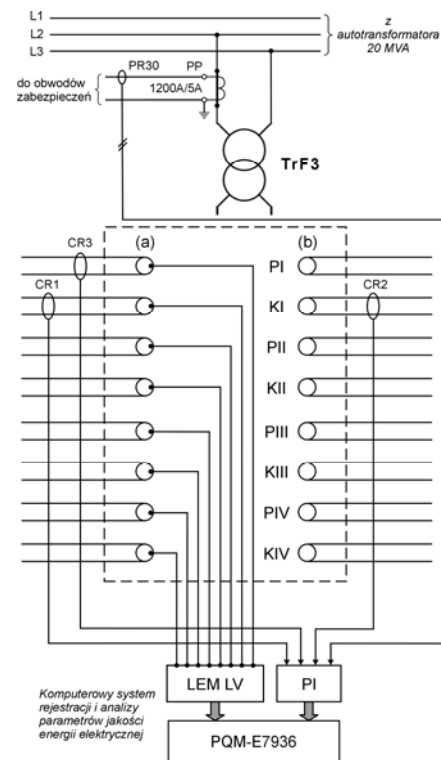
Do pomiarów przebiegów chwilowych napięć i prądów w układzie zasilania torów wieloprądowych pieca łukowo-oporowego na poziomie niskiego napięcia (obwody wtórne transformatorów TrF1 ÷ TrF3 według rys. 2) zastosowano system PQM-E7936, który złożony był z komputera PC wyposażonego w karty pomiarowe oraz oprogramowanie aplikacyjne umożliwiające emulację wielokanałowych oscyloskopów cyfrowych z funkcją ciągłej rejestracji danych pomiarowych.

Do kart pomiarowych doprowadzono cztery sygnały napięciowe, galwanicznie izolowane za pośrednictwem przetworników napięciowych LEM oraz cyklicznie zmieniające trzy sygnały odpowiadające prądom w poszczególnych torach wieloprądowych mierzone z wykorzystaniem cewek Rogowskiego. Dodatkowym sygnałem sprawdzającym były pomiary prądów stron górnych napięć (6 kV) transformatorów TrF1 ÷ TrF3 uzyskiwane z przekładników prądowych PP (rys. 4). Pełny schemat układu pomiarowego dla transformatora fazy trzeciej TrF3 przedstawiono na rysunku 4. Identyczne pomiary zostały wykonane dla pozostałych torów

wieloprądowych transformatorów TrF1 i TrF2 (rys. 1). Zaletą komputerowej rejestracji przebiegów chwilowych napięć i prądów poszczególnych obwodów torów wieloprądowych jest możliwość dalszego przetwarzania danych pomiarowych do określenia ich zasadniczych parametrów impedancyjnych a także jakościowych z punktu widzenia odkształceń od przebiegów sinusoidalnych. Mierzac napięcia i prądy w poszczególnych obwodach torów wieloprądowych można precyzyjnie wyliczyć parametry określające ich impedancje. Pomiary napięć i prądów wykonywane były w sposób cyfrowy z częstotliwością próbkowania 20 kHz na kanał, co pozwoliło zastosować szybką transformatę Fouriera FFT do określenia zawartości bezwzględnych wartości wyższych harmonicznych prądów w poszczególnych torach wieloprądowych. Badanie kształtu przebiegów chwilowych napięć i prądów związane było z prawidłową interpretacją impedancji torów wieloprądowych pieca łukowo-oporowego.



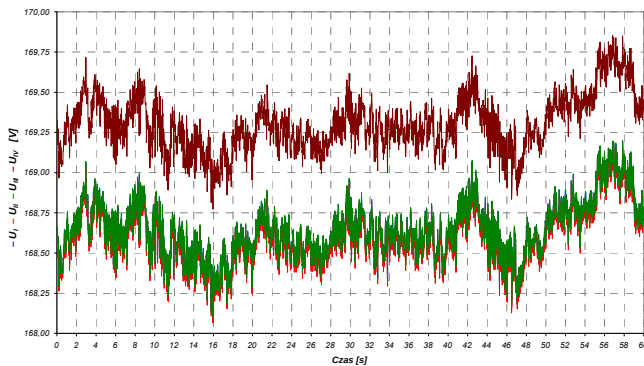
Rys. 3. Schemat połączeń torów wieloprądowych do elektrod pieca łukowo-oporowego



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego dla TrF3

Wyniki pomiarów i obliczeń komputerowych

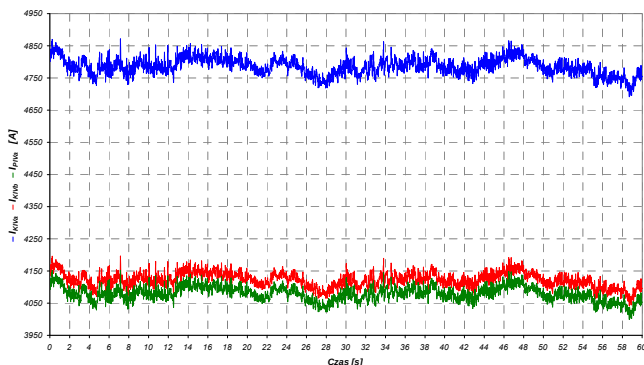
Na podstawie akwizycji sygnałów pomiarowych z obwodów wtórnych transformatorów fazowych TrF1 ÷ TrF3 pieca łukowo-oporowego dla każdego z uzwojeń PI-KI, PII-KII, PIII-KIII i PIV-KIV stron (a) i (b) (rys. 2 i rys. 4) torów bifilarnych zarejestrowane zostały, dla reprezentatywnego przedziału czasu, przebiegi wartości skutecznych napięć i prądów. Zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 4, w dalszej części artykułu przedstawione zostały przebiegi wartości skutecznych napięć i prądów zarejestrowane w obwodach transformatora fazy trzeciej, zaznaczając, iż pozostałe dwie fazy nie wykazują zasadniczych różnic względem pozostałych faz. Z uwagi na ciągły charakter cyklu technologicznego procesu wytopu żelazostopów, skalę czasową ograniczono do jednej minuty, przyjmując za dostatecznie reprezentatywny czas do analizy obciążeń torów prądowych. Stwierdzenie to jest istotne, bowiem w dłuższych okresach czasu rejestracji występuje zgodność parametryczna w kolejnych przedziałach czasowych. Na rysunku 5 przedstawiono wykres zmian wartości skutecznych napięć wtórnych transformatora typu TFORLa 6666/8.



Rys. 5. Wartości skuteczne napięć U_I , U_{II} , U_{III} , U_{IV} zarejestrowane po stronie wtórnej transformatora typu TFORLa 6666/8

Profil zmian napięć wtórnych jest identyczny dla wszystkich czterech uzwojeń, jedynie co do wartości występuje niewielki uchyb wynoszący ok. $0,5 \pm 0,7$ V AC.

Wyraźna asymetria występuje w przebiegach prądów w poszczególnych torach wieloprądowych, związana jest ona z uwarunkowaniami geometrycznymi doprowadzeń do poszczególnych elektrod E1, E2 i E3 (rys. 3). Zmiany wartości skutecznych prądów w poszczególnych torach przedstawiono na rysunkach 6 ÷ 8.

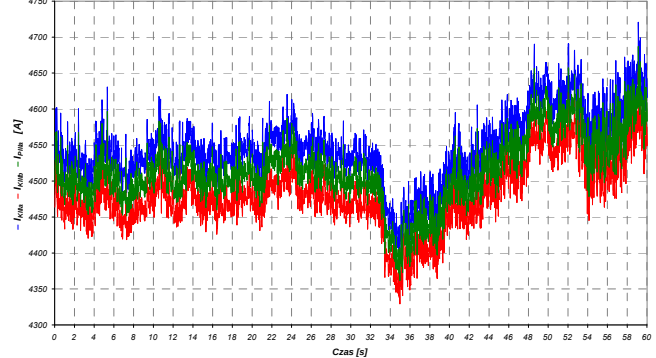


Rys. 6. Wartości skuteczne prądów I_{KIVa} , I_{KIVb} , I_{PIVa} zarejestrowane po stronie wtórnej transformatora TFORLa 6666/8

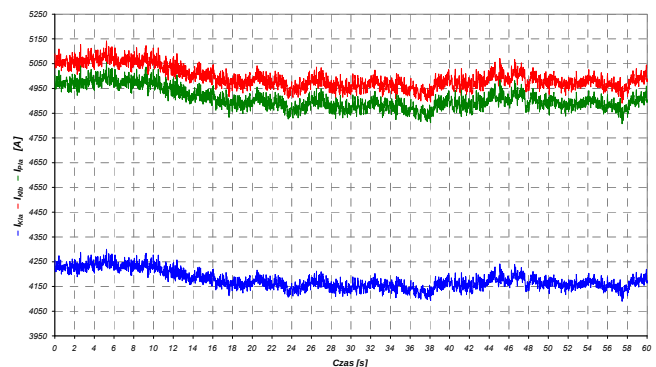
W zbiorze trzech rysunków (rys. 6 ÷ rys. 8) nie zamieszczono przebiegów wyznaczonych dla obwodu II z uwagi na bardzo duże podobieństwo co do kształtu i wartości odpowiadające uzwojeniom grupy III. Analizując

asymetrię prądową i impedancyjną torów prądowych pieca łukowo-oporowego określono kształty napięć i prądów dla wartości chwilowych w okresie $T = 20$ ms.

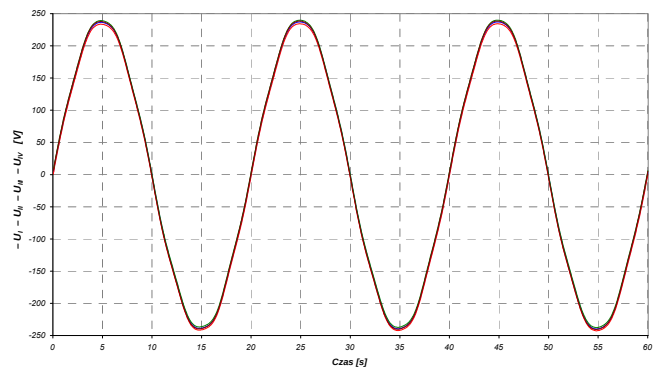
Przykładowe przebiegi zmian napięć i prądów dla trzech kolejnych okresów przedstawione zostały na rysunkach 9 i 10.



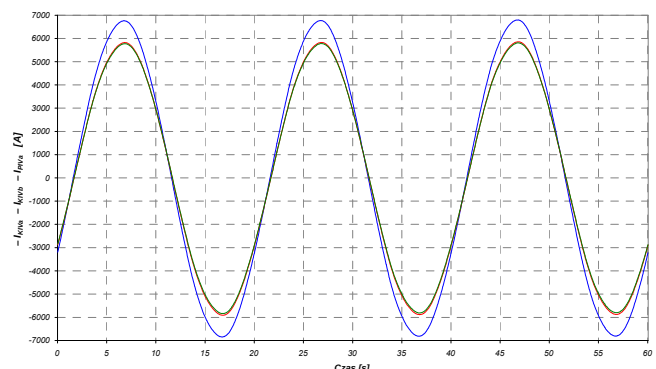
Rys. 7. Wartości skuteczne prądów I_{KIIIa} , I_{KIIIb} , I_{PIIIa} zarejestrowane po stronie wtórnej transformatora TFORLa 6666/8



Rys. 8. Wartości skuteczne prądów I_{KIa} , I_{KIb} , I_{PIa} zarejestrowane po stronie wtórnej transformatora TFORLa 6666/8



Rys. 9. Wartości chwilowe napięć U_I , U_{II} , U_{III} , U_{IV} zarejestrowane po stronie wtórnej transformatora TFORLa 6666/8



Rys. 10. Wartości chwilowe prądów I_{KIVa} , I_{KIVb} , I_{PIVa} zarejestrowane po stronie wtórnej transformatora TFORLa 6666/8

Zarejestrowane sygnały pomiarowe zaprezentowane na rysunkach 9 i 10 zostały przetworzone z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera FFT [3] do postaci widm harmonicznych, które posłużyły do określenia wartości współczynników THD napięć i prądów.

Wzory (1) i (2) ujmują procedurę obliczeń współczynników THD dla napięć i prądów.

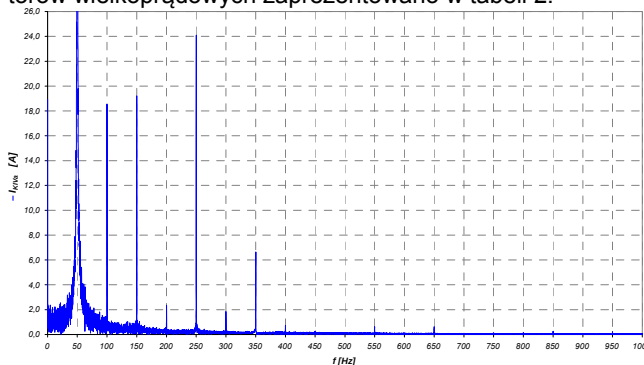
$$(1) \quad THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_I}$$

$$(2) \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_I}$$

gdzie wartościom U_n i I_n określonym wzorami (1) i (2) odpowiadają wartości Y_n dla $n = 1, \dots, 40, \dots, \infty$ szeregu, w którym $y(t)$ jest sygnałem $u(t)$ lub $i(t)$:

$$(3) \quad y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \cos(n\omega t + \psi_n)$$

Z kształtów sygnałów napięciowych i prądowych przedstawionych na rysunkach 9 i 10 wynika, iż odkształcenia od funkcji sinusoidalnej są znikome, co potwierdza rysunek 11, na którym pokazano bezwzględne wartości harmonicznych prądów toru KIVa. Największą wartość osiąga prąd piątej harmonicznej i wynosi ona 24 A (rys. 11). Kolejnymi znaczącymi harmonicznymi prądu toru KIVa są: trzecia i druga o wartościach ok. 19 A. Dokładne procentowe wartości dla poszczególnych rzędów harmonicznych napięć uzwojeń I, II, III i IV oraz prądów torów wieloprądowych zaprezentowano w tabeli 2.



Rys. 11. Widmo spektralne prądu I_{KIVa} zarejestrowane po stronie wtórnej transformatora TFORLa 6666/8

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wartości skutecznych prądów w torach wieloprądowych stwierdzono występowanie zjawiska asymetrii prądowej widocznej szczególnie w skrajnych torach IV (rys. 6) i I (rys. 8). Względnie równe wartości skuteczne prądów, z odchyłką ± 50 A, obserwuje się w torze III (rys. 7) oraz w torze II. W celu zobrazowania stopnia asymetrii prądowej wprowadzono sześć definicyjnych zależności w postaci wzorów od (4) do (9), przyjmując jako odniesienie do symetrycznych wartości prądów skutecznych w torach obwodu III.

$$(4) \quad A_{I1(IV/III)} = \frac{I_{KIVa}}{I_{KIIIa}} \quad (5) \quad A_{I2(IV/III)} = \frac{I_{KIVb}}{I_{KIIIb}}$$

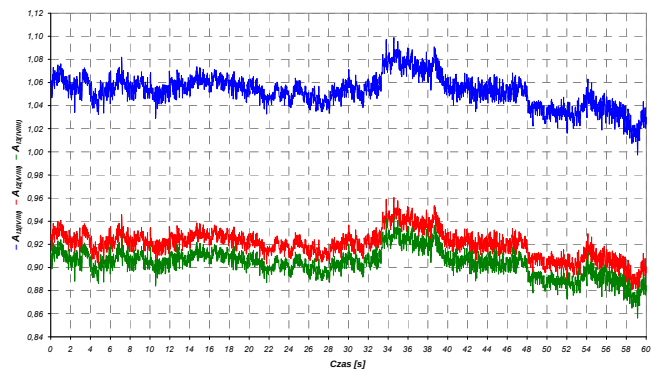
$$(6) \quad A_{I3(IV/III)} = \frac{I_{PIVa}}{I_{PIIIa}} \quad (7) \quad A_{I1(I/III)} = \frac{I_{Kla}}{I_{KIIIa}}$$

$$(8) \quad A_{I2(I/III)} = \frac{I_{Klb}}{I_{KIIIb}} \quad (9) \quad A_{I3(I/III)} = \frac{I_{Pla}}{I_{PIIIa}}$$

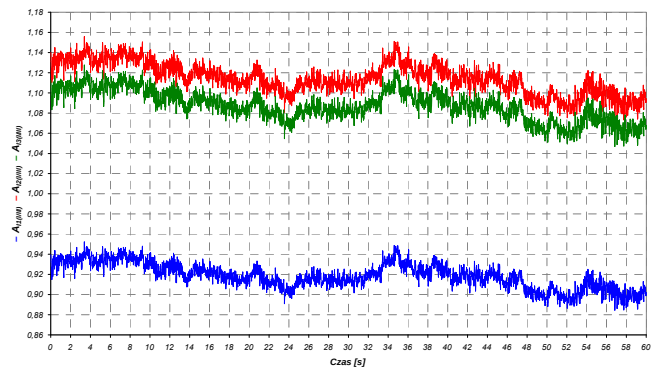
Bazując na zdefiniowanych wskaźnikach asymetrii (4) ÷ (9) wykreślono na kolejnych dwóch rysunkach 12 i 13 zmiany wartości wskaźników asymetrii prądowej dla skrajnych torów prądowych pieca łukowo-oporowego. Ponadto w tabeli 2, oprócz zawartości harmonicznych, zamieszczono również wyznaczone średnie wartości wskaźników asymetrii prądowych dla torów wieloprądowych I i IV.

Tabela 2. Wartości harmonicznych napięć i prądów oraz średnie wartości wskaźników asymetrii prądowych

Parametry wielkości	Znaczące harmoniczne				THD
	$n=2$	$n=3$	$n=5$	$n=7$	
	%	%	%	%	%
Napięcia: $U_I, U_{II}, U_{III}, U_{IV}$	0,10	0,28	0,31	0,91	1,05
Prądy: $I_{Kla}, I_{Klb}, I_{Pla}$	0,46	0,32	0,60	0,24	0,90
Prądy: $I_{KIIIa}, I_{KIIIb}, I_{PIIIa}$	0,38	0,46	0,72	0,20	1,01
Prądy: $I_{KIVa}, I_{KIVb}, I_{PIVa}$	0,60	0,25	0,61	0,05	0,84
Średnie wartości wskaźników asymetrii prądowych					
$A_{I1(IV/III)av}$	$A_{I2(IV/III)av}$	$A_{I3(IV/III)av}$	$A_{I1(I/III)av}$	$A_{I2(I/III)av}$	$A_{I3(I/III)av}$
1,053	0,920	0,904	0,918	1,114	1,087



Rys. 12. Wartości wskaźników asymetrii prądowych: $A_{I1(IV/III)}$, $A_{I2(IV/III)}$, $A_{I3(IV/III)}$



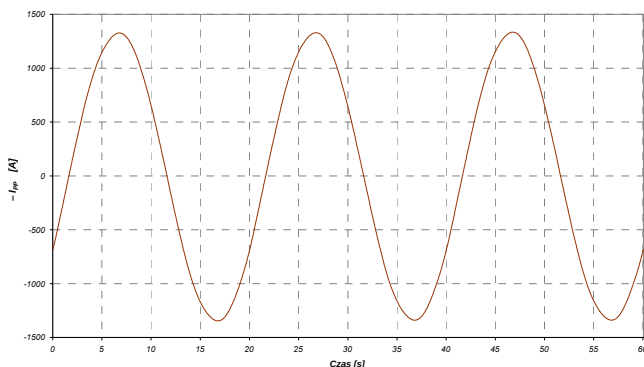
Rys. 13. Wartości wskaźników asymetrii prądowych: $A_{I1(I/III)}$, $A_{I2(I/III)}$, $A_{I3(I/III)}$

Na podstawie uzyskanych z obliczeń wykresów wskaźników asymetrii prądowych można stwierdzić, iż względem środkowych torów wieloprądowych II i III pozostałe skrajne tory wykazują asymetrię prądową zawierającą się w przedziale ok. $\pm 10\%$. Drugim parametrem opisującym asymetrię torów wieloprądowych jest impedancja Z określona dla częstotliwości 50 Hz. Z uwagi na bardzo małe zniekształcenia prądów w torach wieloprądowych (THD_I na poziomie 1%) nie uwzględniono zmiany impedancji dla wyższych harmonicznych. Odpowiednie wartości impedancji Z , rezystancji R , reaktancji X i odpowiadającej jej indukcyjności L wraz z kątem przesunięcia fazowego φ dla poszczególnych torów przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Średnie wartości impedancji torów wieloprądowych

Tor	Z	R	X_L	L	X_L/R	φ
	mΩ	mΩ	mΩ	μH	-	°
KIVa	35,38	30,76	17,48	55,64	0,5682	29,61
KIVb	41,07	35,19	21,18	67,42	0,6018	31,04
PIVa	41,50	35,53	21,46	68,31	0,6039	31,13
KIIIa	37,86	33,07	18,43	58,68	0,5573	29,13
KIIIb	38,42	33,39	19,01	60,51	0,5693	29,65
PIIIa	38,13	33,26	18,65	59,37	0,5607	29,28
KIIa	37,92	33,10	18,51	58,92	0,5592	29,21
KIIb	38,50	33,44	19,07	60,70	0,5703	29,70
PIIa	38,17	33,29	18,68	59,46	0,5611	29,30
KIa	40,93	35,14	20,97	66,76	0,5967	30,82
KIb	34,23	29,53	17,30	55,07	0,5858	30,36
PIa	34,82	30,15	17,42	55,45	0,5777	30,02

O spokojnym charakterze pracy pieca łukowo-oporowego świadczy również oscylogram prądu fazowego strony średniego napięcia transformatora TrF3 uzyskany z przekładnika prądowego PP (rys. 4). Przebieg tego prądu został przedstawiony na rysunku 14.

Rys. 14. Wartości chwilowe prądu I_{pp} zarejestrowane po stronie pierwotnej transformatora TFORLa 666/8

W wyniku analizy harmonicznej prądu I_{pp} w zależności od analizowanego przedziału czasowego stwierdzono występowanie najczęściej trzeciej i piątej harmonicznej prądu o wartościach nieprzekraczających 0,6%.

Podsumowanie

W eksploatowanych piecach łukowo-oporowych stosowane są specjalne sekcjonowane elektrody Söderberga, które wymagają odpowiednich konstrukcji torów wieloprądowych [4], innych niż przewody giętkie w piecu łukowym [5]. W analizowanym przypadku istnieje po osiem zamkniętych torów wyprowadzonych z każdej fazy tworzących bifilarny system torów wieloprądowych dochodzących do wyznaczonego segmentu elektrody. Wartość skuteczna prądu strony dolnego napięcia transformatora rozkłada się na poszczególne tory w sposób asymetryczny, zależnie od geometrii doprowadzeń do elektrod pieca. Na wykresach rys. 12 i rys. 13 pokazano, że wskaźniki asymetrii prądowej torów skrajnych I i IV mieszczą się w przedziale od 90% do 114% względem torów środkowych II i III. Asymetria prądowa jest wynikiem występowania różnic w rezystancjach i reaktancjach torów wieloprądowych, zgodnie z tabelą 3. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów, przy wykorzystaniu metod komputerowych określono stopień odkształcenia napięć i prądów torów wieloprądowych. Stwierdzono, że warunki pracy pieca łukowo-oporowego nie powodują zasadniczych odkształceń napięć i prądów od kształtu sinusoidalnego, co potwierdzają przebiegi zaprezentowane na rysunkach 9, 10 i 14.

Autorzy: prof. ATH dr hab. inż. Kazimierz Jagiela, kazimierz.jagiela@gmail.com, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała; dr inż. Marek Gała, m.gala@el.pcz.czest.pl, mgr inż. Marian Kępiński, kepinski.pcz@gmail.com, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa

LITERATURA

- [1] Trejderowski T., Kopeć G., Machulec B.: Badania statystyczne wpływu wybranych parametrów elektrycznych pieca rezystancyjno-łukowego na jednostkowy wskaźnik zużycia energii w procesie wytopu żelazokrzemu. *Prace IMŻ* (3) 2010, s. 30-33.
- [2] Kurbiel A.: Elektrotermiczne urządzenia łukowe. Wyd. WNT, Warszawa, 1988.
- [3] Zieliński T. P.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań. WKŁ, Warszawa, 2012.
- [4] Hering M.: Podstawy elektrotermii cz. I. Wyd. WNT, Warszawa, 1992.
- [5] Karbowniczek M.: Stalowniczy piec łukowy. Wyd. AGH, Kraków, 2015.